

ANTONELLA SENESE - GUGLIELMINA DIOLAIUTI - CLAUDIA MIHALCEA -
CLAUDIO SMIRAGLIA

EVOLUZIONE METEOROLOGICA SULLA LINGUA DI ABLAZIONE DEL GHIACCIAIO DEI FORNI (LOMBARDIA, GRUPPO ORTLES-CEVEDALE) NEL PERIODO 2006-2008

Introduzione. – Le aree montuose rappresentano zone uniche per il rilevamento di cambiamenti climatici e per la valutazione degli impatti clima-dipendenti (Beniston, 2003). In termini socioeconomici, i paesaggi montani attraggono poi un gran numero di persone per attività turistiche e ricreative che se da una parte concorrono a produrre reddito utile per le popolazioni residenti, dall'altro impongono stress ambientali sempre più intensi che si sommano spesso sinergicamente agli effetti del cambiamento climatico (Godde, Price e Zimmermann, 2000). Per questo motivo le ricerche recenti (Beniston, 2003) hanno suggerito di investigare gli impatti del cambiamento climatico attuale negli ambienti montani remoti delle alte latitudini o delle elevate altitudini, dove le influenze umane dirette o significative sono assai limitate o assenti.

I grandi sistemi orografici coprono solo il 25% della superficie dei continenti (Kapos e altri, 2000). Solo il 26% della popolazione mondiale è insediata in regioni montane o ai piedi delle montagne (Meybeck, Green e Vörösmarty, 2001), tuttavia le risorse indirettamente provenienti dalle zone elevate ne offrono sostentamento a oltre la metà. Il 40% della popolazione mondiale, inoltre, vive in bacini fluviali le cui acque traggono origine dalle varie catene montuose della Terra. Sebbene le montagne differiscano sensibilmente da una regione all'altra, la complessità dell'orografia costituisce una loro caratteristica comune. Fra le caratteristiche orografiche più importanti va sottolineato l'elevato gradiente altimetrico non riscontrabile in altre regioni dei continenti. Questo determina rapide e sistematiche variazioni dei parametri climatici in funzione della quota, in particolare temperatura e precipitazioni, che cambiano su brevissime distanze (Becker e Bugmann, 1997). Ne deriva, quindi, che la montagna offre un'elevata bio e geodi-

versità ⁽¹⁾, spesso con rapide transizioni da aree di bassopiano a paesaggi glaciali e periglaciali. Poiché è il clima in montagna a esercitare un controllo fondamentale su molti sistemi biologici, fisici e chimici, diviene di notevole interesse verificare in queste aree gli effetti indotti dai cambiamenti climatici (Beniston, 2003). Dalla conferenza UNCED (United Nations Environment and Development Conference) di Rio de Janeiro del giugno 1992 (UN, 1992), le aree di montagna sono state incluse fra i sistemi ambientali più sensibili ai cambiamenti climatici, tanto che il Capitolo 13 dell'*Agenda 21* sottolinea l'importanza delle montagne nel sistema ambientale globale, nonché la generale tendenza negativa della qualità dell'ambiente in molte aree di montagna. A questo proposito le Alpi, per la loro localizzazione e morfologia, rivestono un particolare interesse per molti studi climatici e ambientali; si tratta infatti di un «incrocio climatico» nel cuore dell'Europa, dove si sommano influenze oceaniche, continentali, polari, mediterranee e talora sahariane. Va anche aggiunto che le variazioni termiche sulle Alpi sono molto più marcate a scala sia globale sia emisferica.

L'incremento termico verificatosi sulle Alpi sin dall'inizio degli anni Ottanta del XX secolo, pur essendo sincrono con il riscaldamento globale, è infatti di tre volte amplificato rispetto al segnale climatico globale (Diaz e Bradley, 1997). Secondo Beniston (2000), il cambiamento climatico nella regione alpina è stato caratterizzato durante il XX secolo da un incremento di oltre 2 °C delle temperature minime, da un più lieve incremento delle massime e da una tendenza poco identificabile delle precipitazioni. L'unica eccezione al lieve incremento delle massime si è registrato nel 2003, anno caratterizzato dall'improvvisa onda di calore estivo che ha colpito gran parte dell'Europa occidentale e centrale.

I ghiacciai: indicatori dei cambiamenti climatici in atto sulla catena alpina. – L'importanza della criosfera alpina a livello ambientale (per esempio, idrologia e vegetazione) ed economico (per esempio, turismo e gestione delle acque) è stata sottolineata in numerosi studi (*inter alia*, Haeberli e Beniston, 1998; Beniston, 2000). La quantificazione dell'entità di neve e ghiaccio nelle regioni montane e

(1) Il termine «geodiversità» viene usato per la prima volta da Sharples (1993), per descrivere «la diversità degli elementi e dei sistemi della Terra». Dixon (1996) definisce la geodiversità come la varietà o la diversità delle forme, dei sistemi e dei processi in ambito geologico, geomorfologico e pedologico. Barthlott (1996) sottolinea la stretta relazione biunivoca esistente tra i concetti di biodiversità e geodiversità, definita dall'*ecodiversità*, la quale mette in collegamento i biotopi e i geotopi; esiste, infatti, una forte interazione tra gli organismi biologici e il substrato geologico, che si condizionano e mutuano vicendevolmente. Eberhard (1997) evidenzia tra gli aspetti della geodiversità l'eredità della storia della Terra come testimonianza di ecosistemi, ambienti e processi (biologici, atmosferici e idrologici) che agiscono e modificano le rocce, il paesaggio e i suoli. A sua volta Erikstad (1999) sottolinea la fondamentale importanza della geodiversità come elemento di base per gli ecosistemi, ribadendo la necessità di un approccio olistico al tema della conservazione della natura. Anche per Patzak (2000) i termini biodiversità e geodiversità sono concettualmente analoghi, in quanto evidenziano l'uno l'importanza della conservazione biologica per la salvaguardia dell'eterogeneità delle specie e l'altro l'importanza della conservazione delle caratteristiche e dei processi rappresentativi della grande varietà del patrimonio geologico.

delle loro variazioni derivanti dall'incremento termico è basilare per valutare il volume di acqua che defluirà in primavera e nella prima estate nei numerosi sistemi fluviali che si originano dalle Alpi. Le Alpi sono infatti state definite «la torre d'acqua d'Europa» (Mountain Agenda, 2001). Ogni variazione sostanziale nella quantità di neve e nella copertura glaciale potrebbe avere un notevole impatto sui grandi bacini fluviali, non solo per le variazioni delle portate, ma anche per il potenziale incremento di esondazioni, dell'erosione e dei rischi associati (Beniston, 2006). Il bilancio di massa dei ghiacciai ha risposto in modo molto rapido e molto negativo all'incremento termico verificatosi in Europa con la conclusione della Piccola Età Glaciale alla metà del XIX secolo (Haeberli e Beniston, 1998). La principale motivazione di questo fenomeno risiede nel fatto che la maggior parte dei ghiacciai alpini è costituita da ghiaccio temperato, ovvero ghiaccio vicino al punto di fusione; ne consegue che anche un lieve incremento termico in montagna può avere un notevole impatto negativo sui ghiacciai (Oerlemans e altri, 1998). Haeberli (1985) valuta che dal 1850 i ghiacciai delle Alpi abbiano perso a causa del cambiamento climatico il 40% della superficie e oltre il 50% del volume.

Per quanto riguarda l'Italia, il *Catasto dei Ghiacciai Italiani* del 1961 (CNR e CGI, 1961) elenca 838 apparati, di cui 745 inventariati come «glaciers» e 93 come glacionevati o «glacierets» (*sensu* WGMS in IUGG-UNEP-UNESCO, 2005). Il *Catasto* del 1989 riporta 807 apparati, 706 inventariati come «ghiacciai» e 101 come «glacionevati» (Biancotti e Motta, 2000), segnalando quindi una perdita di 31 apparati in 28 anni, con un incremento del numero dei glacionevati che sottolinea ulteriormente la degradazione glaciale. La superficie totale dei ghiacciai italiani si è ridotta da 525 km² nel 1961 a 482 km² nel 1989: -43 km², equivalenti a circa -1,5 km²/anno.

Se si confrontano i dati sulle fluttuazioni dei ghiacciai italiani (una sintesi è riportata in Citterio e altri, 2007a) con le serie di dati sulle temperature, per esempio quelle del progetto ALPCLIM (Böhm e altri, 2001), si osserva che l'intero XX secolo è caratterizzato da un incremento termico che ha raggiunto un massimo verso il 1950 e un secondo negli anni 1990: quest'ultimo raggiunge un valore mai registrato nei 240 anni della serie ALPCLIM (Böhm e altri, 2001). Negli anni Novanta del XX secolo si è quindi registrato il periodo di più elevate temperature (Jungo e Beniston, 2001), situazione che può essere in parte attribuita all'influenza della North Atlantic Oscillation (NAO) ⁽²⁾ (Beniston e Jungo, 2002). Durante

(2) L'Oscillazione Nord Atlantica (in inglese NAO, North Atlantic Oscillation) è un *pattern* di circolazione atmosferica, detto modo di variabilità ad alta frequenza dell'atmosfera, sito nell'Oceano Atlantico settentrionale e caratterizzato dalla fluttuazione ciclica (oscillazione) della differenza di pressione al livello del mare tra l'Islanda e le Azzorre. Attraverso il moto di oscillazione est-ovest della depressione d'Islanda e dell'anticiclone delle Azzorre, si determinano forza e direzione del flusso zonale occidentale e la direzione delle perturbazioni lungo l'Atlantico settentrionale. I venti occidentali fluiscono in media attraverso l'Atlantico portando aria umida sul continente europeo. Un sistema semipermanente di bassa pressione sopra l'Islanda (depressione d'Islanda) e un centro di alta pressione semipermanente sulle Azzorre (anticiclone delle Azzorre) controllano direzione e forza dei venti occidentali sull'Europa. Forza relativa e posizione di questi due sistemi variano di anno in anno

l'ultimo decennio del XX secolo, infatti, sono stati registrati continui valori positivi della NAO. Quando l'indice NAO è elevato il clima delle Alpi tende ad avere precipitazioni inferiori alla media e temperature superiori alla media. Nella serie delle variazioni frontali sono bene osservabili questi due massimi, anche se con un lieve ritardo dovuto alle situazioni locali, che possono spiegare i due picchi di regresso glaciale registrati nei periodi 1943-1952 e 1993-2002 (Citterio e altri, 2007a). Tutti i risultati delle analisi glaciologiche (come le variazioni frontali e le variazioni di superficie) concordano nel segnalare una forte riduzione glaciale che può essere interpretata come un reale impatto del cambiamento climatico.

La meteorologia delle aree di alta quota glacializzate. – Oltre al monitoraggio delle masse glaciali, che rappresentano senza dubbio i più attendibili indicatori dei cambiamenti climatici in atto, è necessario acquisire dati meteorologici in siti rappresentativi dell'alta montagna alpina per periodi lunghi attraverso un'adeguata strumentazione scientifica (in accordo agli standard qualitativi suggeriti dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale) (Diolaiuti e altri, 2009). Solo l'analisi di dati raccolti in alta quota, infatti, può permettere di rilevare e quantificare le evidenze delle variazioni climatiche che qui si manifestano. Gli stessi dati, inoltre, qualora rilevati in aree non solo di elevata altitudine ma anche glacializzate, possono permettere la calibrazione e validazione di modelli analitici per il calcolo dei bilanci energetici e di massa glaciali (Oerlemans, 2005). La superficie di un ghiacciaio differisce dalle zone circostanti e questa differenza è meno evidente in inverno a causa della neve che ricopre sia la superficie del ghiacciaio sia i versanti delle montagne circostanti. Diversamente, durante i mesi estivi le differenze sono più marcate: la copertura nevosa non è più omogenea e, mentre il ghiaccio del ghiacciaio nei settori inferiori è esposto al processo di fusione, nelle aree superiori esso è spesso coperto da neve e nevato (che con un'*albedo* elevata riflettono più del 50% della radiazione solare); le aree rocciose esterne al ghiacciaio sono, invece, per buona parte della stagione estiva, prive di copertura nevosa e assorbono efficacemente la radiazione solare. Il bilancio energetico di queste zone e di conseguenza la temperatura dell'aria saranno quindi diversi da quelli dell'atmosfera a contatto e al di sopra del ghiacciaio.

È pertanto di fondamentale importanza, per calcolare il bilancio energetico di un ghiacciaio, quantificare gli scambi di energia e di massa a livello dell'*atmospheric boundary layer*, scambi che non possono essere stimati sulla superficie del ghiacciaio senza misure dirette. L'*atmospheric boundary layer* è lo strato

e questa variazione è nota, appunto, come NAO. Riferendosi a una situazione di circolazione atmosferica media, un'ampia differenza di pressione tra i punti descritti (*High NAO*, fase NAO positiva) conduce all'incremento dei venti occidentali e conseguentemente a estati fresche e inverni miti e piovosi nel Centro Europa e lungo la costa atlantica, contrapposte a scarsa piovosità sulle regioni del Mediterraneo. Al contrario, se l'indice è basso (*Low NAO*, fase NAO negativa) i venti occidentali sono ridotti, la circolazione è prevalentemente zonale e queste aree soffrono inverni freddi con la traiettoria delle perturbazioni che si sposta verso sud ovvero verso il Mediterraneo. Ciò porta all'incremento di attività perturbata, e con essa precipitazioni, nell'Europa meridionale e in Nord Africa.

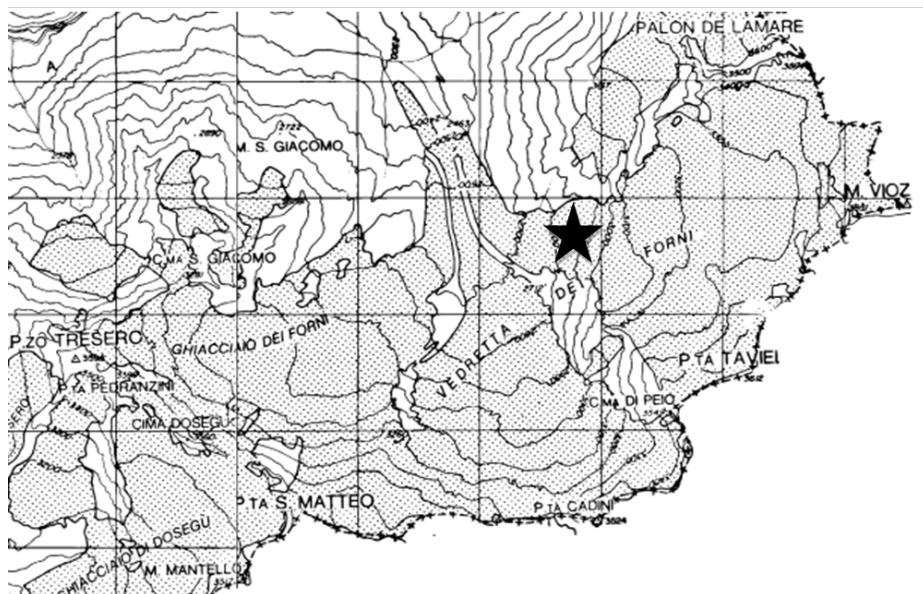


Fig. 1 – Localizzazione della AWS1 Forni (stella nera)

Il reticolato nella carta ha maglia di 1 km

Fonte: Regione Lombardia, CTR Carta Tecnica Regionale (1980, tav. E2A2)

limite atmosferico, ovvero quello strato di atmosfera immediatamente al di sopra – si estende per pochi metri – della superficie terrestre. Le ricerche sul bilancio energetico glaciale hanno avuto inizio dopo la seconda guerra mondiale; i primi lavori furono svolti da Ambach (1963), a cui seguì una serie di altre ricerche (per esempio, Björnsson, 1972; Hogg, Paren e Timmis, 1982; Ishikawa, Owens e Sturman, 1992) che hanno fornito le basi dell'attuale conoscenza su questo tema.

Serie di dati estese temporalmente per decenni sono state ottenute applicando il gradiente altitudinale (*lapse rate*) ai parametri meteorologici, misurati a valle e semplicemente traslati alla quota del ghiacciaio. Recentemente, invece, sono stati realizzati esperimenti glacio-meteorologici misurando gli elementi del flusso energetico superficiale contemporaneamente in molte stazioni automatiche poste sulla superficie dell'area di ablazione di ghiacciai alpini (Oerlemans e Vugts, 1993; Greuell, Knap e Smeets, 1997; Oerlemans e altri, 2004). Questi ultimi studi hanno fornito dati meteorologici sopragliaciali e misure di terreno dei flussi energetici, sebbene per periodi limitati (una o più estati). Per bilanci energetici a lungo termine sui ghiacciai alpini sono necessarie serie di dati più lunghe, che possono essere ottenute solo dalle stazioni meteorologiche permanenti (Automatic Weather Station o AWS) situate sulla superficie dei ghiacciai.

Le prime misure della variazione della lunghezza e del bilancio di massa in Italia sono iniziate rispettivamente nel 1895 (Ghiacciaio dei Forni, Lombardia) e nel 1967 (Ghiacciaio del Careser, Trentino) (Smiraglia, 2003). Nonostante la lunga tradizione italiana in campo glaciologico, dati meteorologici e flussi di

radiazione, misurati direttamente alla superficie d'ablazione di un ghiacciaio, non sono stati disponibili fino all'installazione della prima AWS permanente, collocata sul Ghiacciaio dei Forni (Alta Valtellina, Alpi Lombarde) il 26 settembre 2005 (figg. 1 e 2) (Citterio e altri, 2007b; Diolaiuti e altri, 2009). Prima di quella data, tutte le altre AWS italiane in alta quota erano localizzate su rocce emergenti («isole perse» o *nunatak*) o presso rifugi e bivacchi di alta quota.

La stazione AWS1 Forni e il Ghiacciaio dei Forni. – La stazione ubicata sul Ghiacciaio dei Forni è quella che a oggi ha permesso di raccogliere il maggior numero di dati sulle condizioni micro-meteorologiche alla superficie del ghiacciaio, in particolare dell'area di ablazione. Il Ghiacciaio dei Forni è il più vasto apparato vallivo delle Alpi Italiane con una superficie di circa 12 km² e ubicato nel gruppo Ortles-Cevedale, Parco Nazionale dello Stelvio, Lombardia. Il ghiacciaio è esposto a nord e si estende fra i 2.600 m e i 3.670 m.

Le coordinate WGS84 della AWS (denominata AWS1 Forni) sono le seguenti: 46° 23' 56,0" N, 10° 35' 25,2" E, 2.669 m (elevazione ellissoidica WGS84). La stazione è localizzata nel settore mediobasso del ghiacciaio alla base della seraccata orientale, a circa 800 m dalla fronte glaciale. Questo sito rappresenta un buon compromesso fra la necessità di minimizzare gli effetti della topografia locale e la ricerca di un luogo con bassa probabilità di eventi valanghivi che potrebbero danneggiare la stazione. Le montagne circostanti arrivano a un'altezza di 3.200-3.700 m, fra cui la più alta è il Palon della Mare, 3.703 m, seguita dal Monte San Matteo 3.678 m; queste cime creano condizioni di ombra soprattutto sui settori meridionali e orientali del ghiacciaio.

La AWS1 Forni è equipaggiata con un *data logger* Babuc ABC a 20 canali della LSI-Lastem, ed è omologa alle stazioni correntemente in uso in alta quota nella rete di monitoraggio himalayana di Ev-K2-CNR, che include la AWS al CNR *Pyramid Laboratory* italiano a 5.050 m nell'area del Monte Everest e la AWS posta a 8.000 m di quota al Colle Sud del Monte Everest. La AWS è fornita di sensori per misurare la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la velocità e la direzione del vento, la pressione atmosferica, la radiazione solare in entrata e in uscita in un *range* dello spettro di 0,3-3 µm e la radiazione a infrarossi in un intervallo di 5-50 µm proveniente dall'atmosfera e dalla superficie del ghiacciaio. In particolare, i dati radiativi sono rilevati tramite i quattro sensori, 2 pyranometri e 2 pyrgeometri, del radiometro netto Kipp & Zonen, CNR-1. Inoltre sono stati installati un pluviometro di dimensioni di 1.000 cm² e un nivometro a ultrasuoni o *sonic ranger*, modello Campbell SR-50, per misurare il livello, rispettivamente, della pioggia e della neve. Allo scopo di permettere la connessione del *sonic ranger* SR-50 al *data logger* Babuc ABC e di acquisire letture digitali del livello della neve, è stata ideata e costruita un'interfaccia digitale adatta a operare in condizioni di bassa temperatura.

L'alimentazione della stazione è fornita da due pannelli solari da 40 W di potenza nominale combinata, che tamponano una batteria di 100 Ah e 12 V; il livello di carica della batteria è registrato dal *data logger* per permetterne una



Fig. 2 – *La stazione meteorologica permanente italiana (AWS) installata sul Ghiacciaio dei Forni (AWS1 Forni)*

verifica nella fase di scarico dei dati. La batteria e i pannelli solari permettono un'autonomia della stazione di almeno due mesi anche in assenza di insolazione diretta, dovuta per esempio alla copertura dei pannelli da parte della neve in inverno. I 20 canali del *data logger* sono inoltre utilizzati solo per metà e quindi vi sono numerosi canali liberi per implementare la stazione, in futuro, con altri sensori: per esempio per misurare la temperatura della neve e/o del ghiaccio a diverse profondità. L'immagazzinamento dei dati avviene in una scheda di memoria veloce di 2 MB che permette di registrare oltre sei mesi di dati. La stazione è inoltre dal 2009 in costante controllo da remoto con i laboratori dei ricercatori dell'Università di Milano e del Comitato Ev-K2-CNR attraverso un sistema radio-GSM modem. Questo permette di conoscere le condizioni meteo sul ghiacciaio in tempo reale e di effettuare una tempestiva diagnostica dei sensori localizzati sulla stazione. L'intero sistema è sostenuto da un quadripode metallico, in acciaio inossidabile alto 5 m dalla superficie del ghiaccio, simile a quelli proposti e testati dall'IMAU (Oerlemans, 2001).

Metodi. – Si sono analizzati i dati di temperatura dell'aria, radiazione a onda corta e innevamento raccolti alla stazione meteorologica automatica (AWS) durante i primi tre anni di attività (1 gennaio 2006-31 dicembre 2008).

I dati di temperatura dell'aria, misurati a 2 m di altezza dalla superficie del ghiacciaio, sono stati elaborati per calcolare l'escursione termica giornaliera e annua; inoltre, i valori massimi e minimi giornalieri sono stati esaminati per confrontarne l'andamento stagionale e annuale e per determinare il mese più caldo e quello più freddo.

Il secondo parametro analizzato è stato la radiazione solare o radiazione a onda corta sia in entrata (*Short Wave Incoming* o *SWin*) sia in uscita (*Short Wave Outgoing* o *SWout*). È stato prima effettuato un pre-processamento per evidenziare i dati «non senso», ovvero i dati *SWin* minori dei corrispondenti valori *SWout* a seguito della parziale o totale copertura del pyranometro superiore da parte della neve. Questi dati, risultati numericamente assai limitati e prevalentemente concentrati nelle ore di intensa precipitazione nevosa, sono stati esclusi dall'analisi. Infatti, appena terminato l'evento, in genere il vento o la radiazione solare provvedono a ripulire la superficie del sensore in pochissime ore. Si sono successivamente analizzati entrambi i flussi radiativi (*SWin* e *SWout*) per quantificare l'*albedo* o riflettività della superficie glaciale. Questa si esprime come α , è adimensionale e assume valori compresi tra 0 (corpo nero, assorbimento completo) e 1 (specchio, riflessione totale). Si calcola come rapporto tra la radiazione in uscita e quella in entrata:

$$\alpha = SW\ out / SW\ in$$

L'*albedo* superficiale è un parametro particolarmente importante a livello glaciologico in quanto condiziona l'entità dell'ablazione. Essa varia in funzione della struttura dei cristalli, della morfologia della superficie, della concentrazione di polvere (*dust*) e fuliggine (*black carbon*), dello spessore e granulometria del morenico superficiale, dalla presenza di acqua allo stato liquido nelle fratture del ghiaccio e in superficie, dell'elevazione del sole, della nuvolosità eccetera. La variazione nello spazio e nel tempo dell'*albedo* superficiale è considerevole. Il modo più corretto per definire questo valore e la sua variazione in un'area di ablazione di un ghiacciaio vallivo, con un alto grado di risoluzione nel tempo, è attraverso l'uso di un radiometro netto installato su una AWS come il CNR1 installato sulla AWS1 Forni.

Il livello della neve presente sulla superficie del ghiacciaio è l'ultimo parametro preso in esame. Il *sonic ranger* è un sensore a ultrasuoni in grado di calcolare la distanza tra la superficie del ghiacciaio e la posizione dove esso è collocato: conoscendo la velocità di propagazione degli ultrasuoni e misurando il tempo impiegato per arrivare alla superficie e ritornare allo strumento, il sensore calcola la distanza percorsa. I dati registrati dal nivometro, quindi, corrispondono alla distanza fra il sensore e la superficie; per ottenere il valore dello spessore nevoso al suolo è necessario pertanto sottrarre all'altezza a cui è posto il sensore (317 cm nel caso della AWS1 Forni) il valore registrato. Anche per l'altezza della neve è

Tab. 1 – *Escursione termica giornaliera massima e giornaliera minima, temperature medie giornaliere massime e minime e mensili massime e minime sul Ghiacciaio dei Forni 2006, 2007 e 2008*

	2006	2007	2008	media
escursione termica giornaliera massima	26,8 °C (registrato il 13/03/2006)	21,7 °C (registrato il 30/05/2007)	22,7 °C (registrato il 06/03/2008)	23,7 °C
escursione termica giornaliera minima	2,5 °C (registrato il 07/12/2006)	2,8 °C (registrato il 23/11/2007)	2,4 °C (registrato il 14/12/2008)	2,6 °C
temperatura media giornaliera massima	+10,0 °C (registrato il 20/06/2006)	+10,4 °C (registrato il 17/07/2007)	+11,1 °C (registrato il 25/06/2008)	10,5 °C
temperatura media giornaliera minima	-18,8 °C (registrato il 12/03/2006)	-17,7 °C (registrato il 15/11/2007)	-17,8 °C (registrato il 23/11/2008)	-18,1 °C
temperatura media mensile massima	+7,5 °C (registrato a luglio 2006)	+6,1 °C (registrato a luglio 2007)	+6,4 °C (registrato ad agosto 2008)	6,7 °C
temperatura media mensile minima	-10,2 °C (registrato a febbraio 2006)	-8,1 °C (registrato a dicembre 2007)	-7,9 °C (registrato a dicembre 2008)	-8,7 °C

stato necessario filtrare ed escludere dall'elaborazione i dati non-senso. Questi possono essere minori di zero, e sono solitamente dovuti all'azione del vento che se troppo intenso disturba le letture. In altri casi possono essere molto elevati e riferiti a un'unica registrazione, per esempio in un'unica ora del giorno una lettura di 180 cm e nelle ore successive spessori nevosi costantemente inferiori, possono essere attribuiti al passaggio di un turista o di un animale al di sotto del sensore.

Risultati. – *Temperatura.* Poiché la stazione sul ghiacciaio è attiva dall'1 ottobre 2005, è stato possibile confrontare per la prima volta i dati di temperatura di tre anni (1 gennaio 2006-31 dicembre 2008). Prima sono stati considerati i dati di ogni singolo anno separatamente, poi sono stati messi a confronto e infine si sono analizzate anche le similitudini o differenze fra le stagioni meteorologiche di ogni anno. Durante il terzo anno non è stato possibile includere nell'analisi il periodo dal 5 all'11 ottobre 2008 (in totale 6 giorni) per la mancata registrazione dei dati in quei giorni a seguito di un'interruzione nel ciclo di memorizzazione del *data logger* della stazione.

Nella tabella 1 sono presentati i valori medi del triennio dell'escursione termica annua e giornaliera massima (si veda anche il grafico di fig. 3) e minima, delle temperature medie giornaliere massime e minime, delle temperature medie mensili massime e minime.

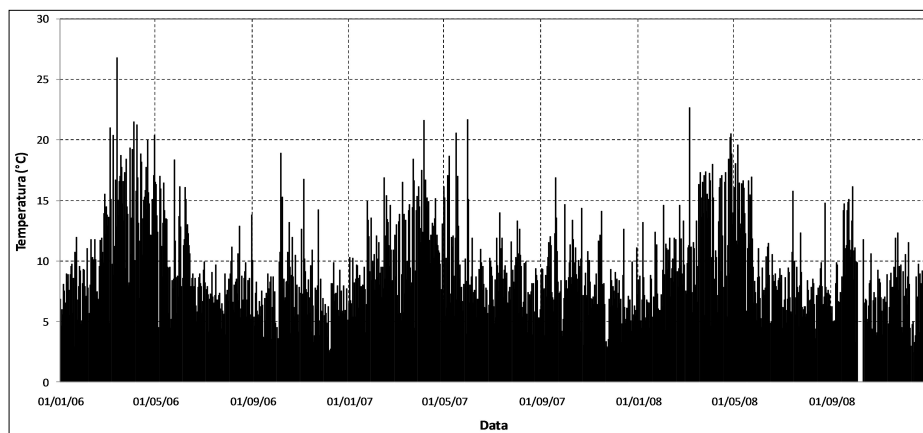


Fig. 3 – Escursione termica giornaliera massima sul Ghiacciaio dei Forni 2006, 2007 e 2008

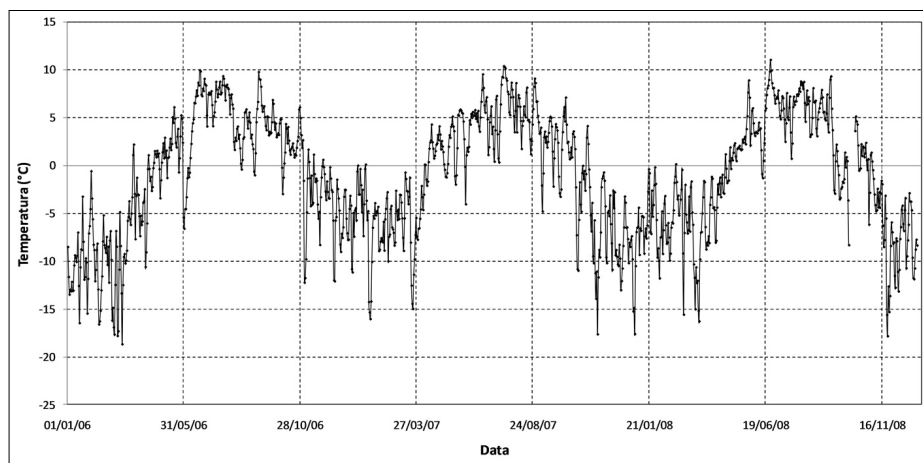


Fig. 4 – Temperatura media giornaliera sul Ghiacciaio dei Forni 2006, 2007 e 2008

L'evoluzione della temperatura media giornaliera 2006, 2007 e 2008 è evidenziata nel grafico di figura 4, mentre il confronto fra i valori termici medi mensili dei tre anni è evidenziato nel grafico della figura 5 e nella tabella 2.

Si constata dalla tabella 2 che l'inverno più rigido è stato quello del 2006, mentre quello più mite si è registrato nel 2007. Stesso andamento si osserva per la primavera, che conferma la mitezza del 2007 (il 2007 ha registrato temperature primaverili più elevate del 2006 per 65 giorni e del 2008 per 62 giorni).

Per quanto riguarda l'estate, la più calda, considerando il valore medio stagionale, è risultata quella del 2008 con 5,9 °C e con un totale di 47 giorni con valori termici superiori al 2007 e di 53 giorni caratterizzati da temperature più elevate rispetto al 2006. Va tuttavia sottolineato che il mese di luglio con temperature nettamente più elevate è risultato quello del 2006, dato che a livello glaciologico

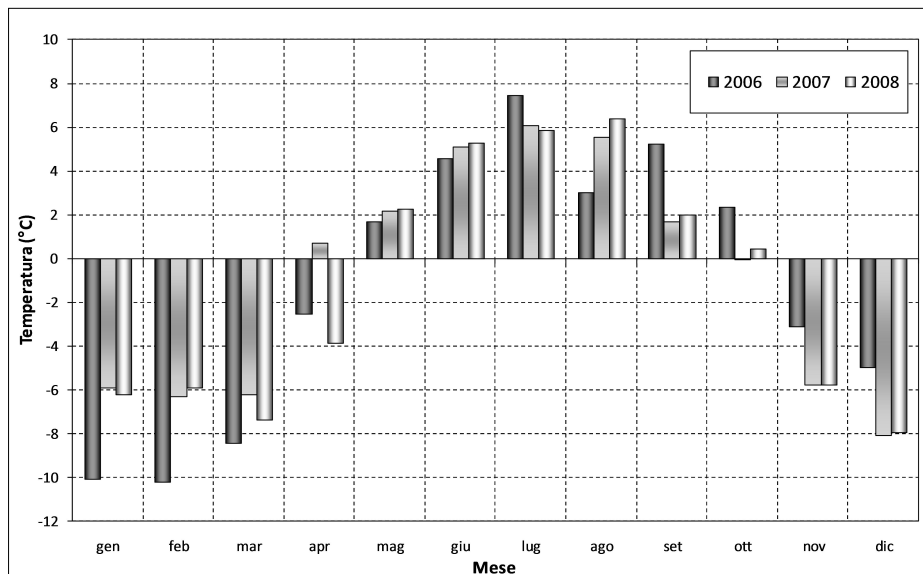


Fig. 5 – *Temperatura media mensile sul Ghiacciaio dei Forni 2006, 2007 e 2008*

è molto significativo poiché in questo periodo si verifica normalmente il massimo dell'ablazione.

Il 2006, a fronte dell'inverno più rigido del triennio, ha fatto registrare l'autunno più mite sia considerando il valore medio stagionale (+1,5 °C rispetto a -1,4 °C del 2007 e -1,2 °C del 2008) sia il numero di giornate con i valori di temperatura media giornaliera superiori (67 rispetto al 2007 e 64 rispetto al 2008).

Radiazione solare e albedo. I dati radiativi a onda corta sia in entrata (SW*in*) sia in uscita (SW*out*) dall'1 gennaio 2006 al 31 dicembre 2008 sono stati elaborati per calcolare l'*albedo* o riflettività (fig. 6). Nel corso di un anno la curva della radiazione in entrata ha un andamento quasi sinusoidale con una progressiva diminuzione della differenza tra i picchi di massimo e quelli di minimo. In generale, la presenza di picchi invernali è dovuta al fenomeno della multiriflessione, ossia al fatto che la radiazione non proviene soltanto dal sole, ma è anche riflessa dalle pareti coperte dalla neve o dal ghiaccio che hanno un'*albedo* elevata.

Analizzando i valori orari della radiazione in entrata si osserva la presenza di picchi elevati (superiori ai 1.200 W m⁻²) che è dovuta, oltre che alla multiriflessione, anche al minore spessore di atmosfera che la radiazione deve attraversare per giungere sino alla superficie del ghiacciaio rispetto, per esempio, a una località posta sul livello del mare. Il massimo dell'onda corta in uscita (a differenza di quella in entrata) non si raggiunge in estate in coincidenza delle giornate con maggior insolazione ed elevazione solare, ma è invece registrato a fine primavera quando la coltre nevosa è ancora presente sul ghiacciaio (elevata *albedo*) e le giornate sono caratterizzate da intensa SW*in*. In estate, anche se il numero di ore di insolazione è maggiore e l'elevazione solare aumenta, prevale l'effetto di

Tab. 2 – *Temperature medie stagionali e mensili sul Ghiacciaio dei Forni 2006, 2007 e 2008*

stagione	temp. stagionali		2006	temp.	2007	temp.	2008	temp.
inverno	2006	-10,4 °C	dic. (2005)	-10,8 °C	dic. (2006)	-5,0 °C	dic. (2007)	-8,1 °C
	2007	-5,7 °C	gen.	-10,1 °C	gen.	-5,9 °C	gen.	-6,2 °C
	2008	-6,7 °C	feb.	-10,2 °C	feb.	-6,3 °C	feb.	-5,9 °C
primavera	2006	-3,1 °C	mar.	-8,4 °C	mar.	-6,2 °C	mar.	-7,4 °C
	2007	-1,1 °C	apr.	-2,5 °C	apr.	0,7 °C	apr.	-3,8 °C
	2008	-3 °C	mag.	1,7 °C	mag.	2,2 °C	mag.	2,3 °C
estate	2006	5 °C	giu.	4,6 °C	giu.	5,1 °C	giu.	5,3 °C
	2007	5,6 °C	lug.	7,5 °C	lug.	6,1 °C	lug.	5,9 °C
	2008	5,9 °C	ago.	3,0 °C	ago.	5,5 °C	ago.	6,4 °C
autunno	2006	1,5 °C	set.	5,2 °C	set.	1,7 °C	set.	2,0 °C
	2007	-1,4 °C	ott.	2,4 °C	ott.	-0,1 °C	ott.	0,5 °C
	2008	-1,1 °C	nov.	-3,1 °C	nov.	-5,8 °C	nov.	-5,8 °C

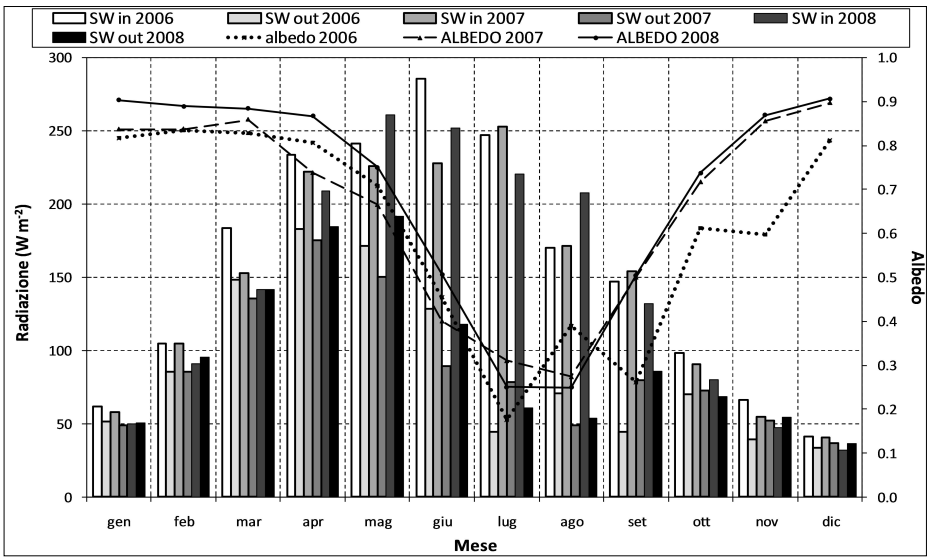


Fig. 6 – *Medie mensili della radiazione a onda corta in entrata e in uscita e dell'albedo sul Ghiacciaio dei Forni 2006, 2007 e 2008*

minor riflettività dalla superficie glaciale di ghiaccio vivo, priva di copertura nevosa. All'inizio di ottobre vi è di nuovo un repentino incremento della *SWout* in corrispondenza delle prime nevicate. Considerando invece i valori medi giornalieri, la radiazione a onda corta in entrata risulta caratterizzata da valori minori poiché nella media influiscono i valori nulli notturni che, in base al periodo dell'anno, possono superare quelli con la luce. Una radiazione giornaliera inferiore della metà del valore orario è dovuta anche all'ombreggiatura offerta dalle pareti

Tab. 3 – Medie mensili dello spessore del manto nevoso sul Ghiacciaio dei Forni 2006, 2007 e 2008

mese	2006	2007	2008
Gennaio	107,94	54,05	111,18
Febbraio	140,06	79,40	131,95
Marzo	182,31	105,34	147,84
Aprile	201,54	96,29	203,25
Maggio	160,75	42,81	180,93
Giugno	62,53	17,76	59,27
Luglio	22,40	22,40	6,56
Agosto	17,71	29,29	24,03
Settembre	1,73	15,88	38,83
Ottobre	6,30	9,08	30,05
Novembre	9,18	35,50	104,79
Dicembre	35,73	67,47	190,39

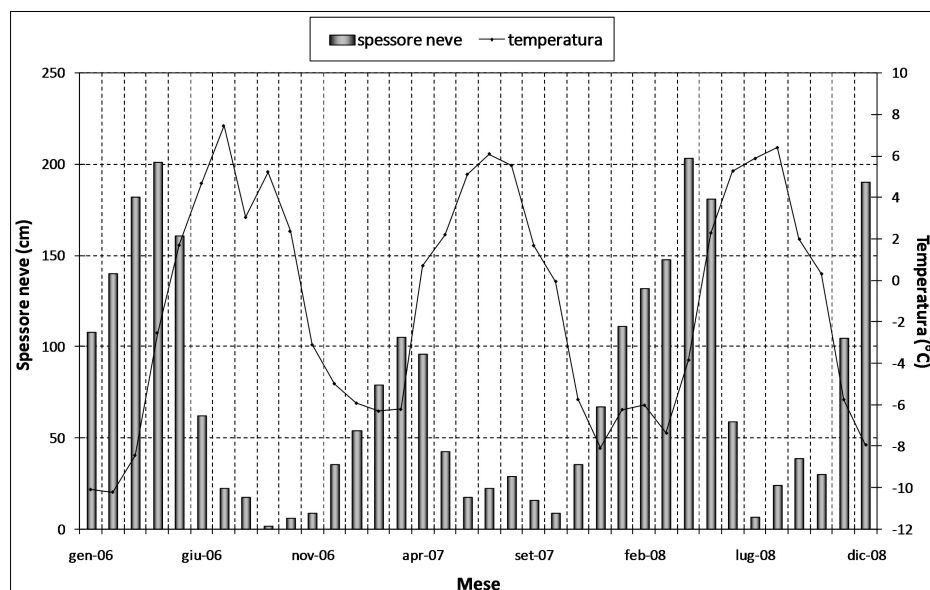


Fig. 7 – Medie mensili dello spessore della neve e della temperatura sul Ghiacciaio dei Forni 2006, 2007 e 2008

rocciose incassanti, le quali schermano la stazione AWS1 Forni e quindi diminuiscono le ore di irraggiamento.

I valori di *albedo* (fig. 6) sono stati calcolati (si veda equazione) mediando prima a scala giornaliera, poi mensile, i dati orari ottenuti da quelli della radiazione. Si sono poi confrontate le medie mensili della radiazione in entrata con quelle della radiazione in uscita (grafici a barre) e con quelle dell'*albedo* (grafico a linee). Avvicinandosi al solstizio d'estate (21 giugno), le ore di luce aumentano

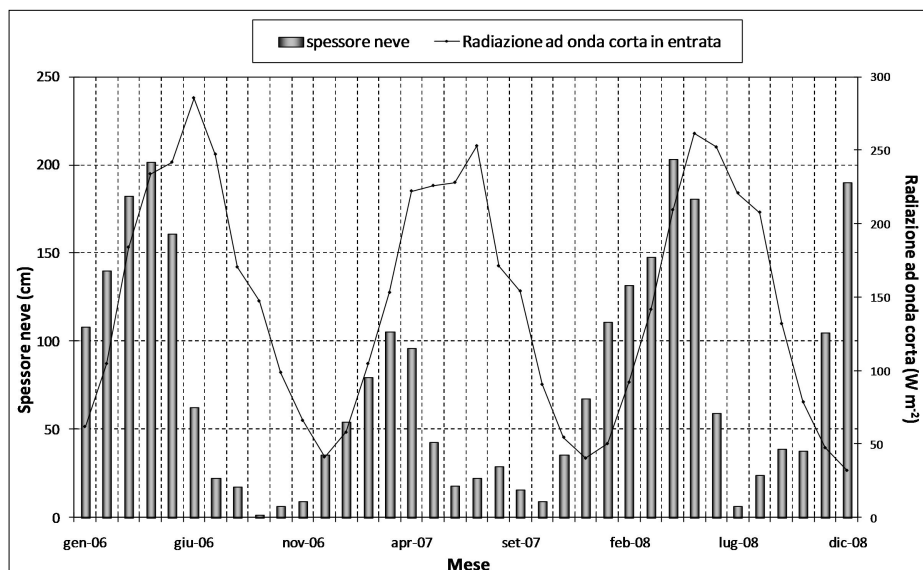


Fig. 8 – Medie mensili dello spessore della neve e della radiazione a onda corta in entrata sul Ghiacciaio dei Forni 2006, 2007 e 2008

rispetto a quelle senza illuminazione e, coerentemente, sono stati registrati valori della radiazione a onda corta in entrata più elevati nei mesi di maggio, giugno e luglio. Valori pressoché simili dei due flussi di radiazione a onda corta stanno a significare invece la presenza sulla superficie di neve riflettente. In estate, infatti, si osserva un'*albedo* ridotta dovuta alla marcata differenza fra i valori di *SW_{in}* e *SW_{out}*. Come si osserva dalla figura 6, i valori rimangono pressoché costanti nei primi quattro mesi dopodiché si registra una graduale diminuzione (dovuta alla maggiore differenza della radiazione in entrata e in uscita) seguita da una nuova crescita, ma meno lineare. In particolare, i mesi invernali sono sempre caratterizzati da valori maggiori rispetto a quelli estivi: il picco di minimo nei tre anni è stato di 0,27 (agosto 2007) e di 0,25 (luglio e agosto 2008).

Spessore del manto nevoso. Le variazioni dello spessore del manto nevoso nel triennio considerato sono presentate nella tabella 3 e nelle figure 7, 8 e 9. In queste ultime lo spessore della neve è stato correlato con le temperature, con la radiazione *SW_{in}* e con l'*albedo*.

Si tratta di tre parametri interdipendenti in quanto intensa radiazione ed elevate temperature provocano riduzione di spessore ed estensione della neve, fenomeno che a sua volta provoca una riduzione dell'*albedo* e una successiva ulteriore riduzione dell'innnevamento.

Dall'osservazione dei grafici si ha la conferma di come temperatura e radiazione siano direttamente correlate fra di loro e inversamente correlate all'*albedo* e allo spessore della neve, mentre fra questi due ultimi parametri vi è un'elevata correlazione diretta. Dalla tabella 3 si constata come lo spessore medio mensile

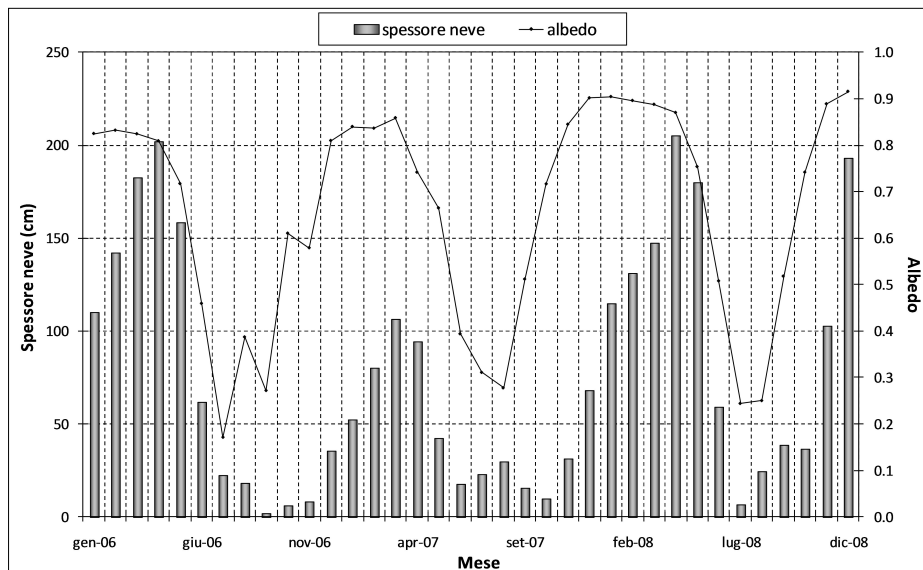


Fig. 9 – Medie mensili dello spessore della neve e dell'albedo sul Ghiacciaio dei Forni 2006, 2007 e 2008

più elevato sia stato attorno ai 2 m (aprile 2006 e 2008) e come la stagione con maggiori spessori sia stata quella primaverile.

Conclusioni e sviluppi futuri. – L'elaborazione dei dati raccolti dalla stazione AWS1 Forni ha permesso di caratterizzare la meteorologia della lingua del Ghiacciaio dei Forni per il triennio 2006-2008. In particolare, i valori termici stagionali (media triennale) sono oscillati fra $-7,6^{\circ}\text{C}$ in inverno e $5,5^{\circ}\text{C}$ in estate con il mese più freddo e il mese più caldo risultati rispettivamente dicembre (-8°C) e luglio ($6,5^{\circ}\text{C}$). La media triennale delle medie giornaliere massime è risultata $10,5^{\circ}\text{C}$, mentre quella delle minime -8°C . Lo spessore nevoso mensile più elevato medio per il triennio è stato registrato in aprile e in marzo con poco meno di 1,5 m. Particolarmente interessante a livello glaciologico è stata la quantificazione dell'*albedo*, calcolata come rapporto fra *SWout* e *SWin*, e della sua variazione stagionale. L'*albedo* è oscillata tra valori invernali (con superficie innevata) che hanno superato 0,9 e valori estivi (con superficie di ghiaccio) che sono scesi al di sotto di 0,2, con un valore medio annuo nel triennio di 0,46. Quest'ultimo valore, ma anche quelli degli altri parametri meteorologici misurati, è in buon accordo con i dati raccolti da altre AWSs situate sulla superficie di ablazione di ghiacciai alpini (per esempio le AWSs dell'IMAU, in particolare quella del Morteratschgletscher – Oerlemans, 2000; Oerlemans e altri, 2004; Oerlemans, 2005 – con *albedo* medio annua 0,49), confermando quindi l'idonea localizzazione della AWS1 Forni e il corretto funzionamento degli strumenti.

Chiaramente il periodo di funzionamento dell'AWS1 Forni è troppo breve per

poter individuare tendenze ed evoluzioni a livello meteo-climatico. I dati raccolti saranno tuttavia estremamente utili per calibrare i modelli di bilancio energetico che vengono utilizzati per determinare il bilancio di massa glaciale, parametro fondamentale nell'individuazione della fase evolutiva di un ghiacciaio. Prima dell'installazione delle stazioni supraglaciali, si potevano utilizzare a questo scopo solo dati di temperatura dell'aria registrati da stazioni situate a valle, da cui poi si estrapolavano, attraverso il gradiente altitudinale (o *lapse rate*, posto generalmente pari a 0,65 °C ogni 100 m), i valori termici delle zone poste a quote superiori. Analogamente, l'*albedo* glaciale veniva quantificata in base a valori di letteratura. I dati raccolti dalla stazione ubicata sul Ghiacciaio dei Forni nei primi tre anni di attività hanno tra l'altro evidenziato la non completa corrispondenza tra i risultati ottenuti tramite l'utilizzo del *lapse rate* e dell'*albedo* di letteratura e i dati di temperatura e di radiazione effettivamente registrati, evidenziando maggiormente la necessità di disporre di dati misurati alla superficie del ghiacciaio.

Approfondendo ulteriormente l'elaborazione, ovvero tenendo conto anche dei dati della radiazione a onda lunga (sia in entrata sia in uscita) registrati sul ghiacciaio attraverso il radiometro netto CNR1 e dei flussi turbolenti (calore latente e calore sensibile calcolati partendo dai parametri misurati a livello della AWS), sarà inoltre possibile quantificare l'energia netta disponibile per la fusione del ghiaccio e/o neve. Infine, per estendere la modellazione del bilancio energetico a tutta la superficie del ghiacciaio, necessario per definire le perdite di massa (per fusione e sublimazione) che giocano un ruolo fondamentale nell'analisi del bilancio di massa totale alla fine di ogni anno idrologico, si dovranno anche raccogliere dati specifici sulla microtopografia del ghiacciaio, in particolare sulla distribuzione dei crepacci, che provocano una forte variabilità spaziale delle irregolarità morfologiche della superficie glaciale e influenzano il bilancio energetico superficiale.

In sintesi, la disponibilità di dati meteorologici raccolti nelle aree di ablazione del ghiacciaio permetterà di sviluppare un modello più preciso e attendibile dei suoi scambi di energia e di massa anche senza una AWS collocata sulla sua superficie. Infatti, una volta che siano stati misurati questi parametri sulla superficie del ghiacciaio e che siano noti i gradienti degli stessi rispetto alle misure effettuate a valle, sarà possibile calcolare la loro intensità sul ghiacciaio anche in assenza di una AWS. Il presente lavoro costituisce quindi la base per la formulazione di modelli di bilancio energetico e di massa estesi a tutto il ghiacciaio, partendo da dati registrati da stazioni meteorologiche situate all'esterno del ghiacciaio e quindi più facili da gestire.

Ringraziamenti. – Gli autori ringraziano il Comune di Valfurva, la Provincia di Sondrio, il Comitato di Gestione Lombardo del Parco Nazionale dello Stelvio per la collaborazione fornita alle ricerche micro-meteorologiche sul Ghiacciaio dei Forni. Un sentito ringraziamento a Roberto Chillemi, Eraldo Meraldi e Gian Pietro Verza, preziosi collaboratori tecnico-scientifici senza il contributo dei quali non sarebbe stata possibile la ricerca esposta.

L'installazione della stazione sopragliaciale Forni e il progetto di ricerca nel quale essa si inserisce sono stati sostenuti da diversi enti pubblici e privati (MIUR, Comitato Ev-K2-CNR, a2a, ARPA Lombardia, Lsi-LASTEM) e dall'attività di numerosi volontari (soci del Club Alpino Italiano, membri del Corpo Nazionale del Soccorso Alpino e Speleologico del Club Alpino Italiano – stazione di Valfurva, studenti dell'Università degli Studi di Milano e del Politecnico di Milano).

Dal 2008 la stazione AWS1 Forni afferisce alla rete di monitoraggio ambientale del progetto *SHARE (Stations at High Altitude for Research on the Environment)*, coordinato dal Comitato Ev-K2-CNR di Bergamo. Dall'agosto 2009, inoltre, la AWS1 Forni è stata inserita nel programma internazionale *CEOP (Coordinated Energy and Water Cycle Observations Project)* nell'ambito del progetto *GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment, World Climate Research Program)*.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- AMBACH W., *Untersuchungen zum Energieumsatz in der Ablationzone des Grönlandischen Inlandeises*, in «Meddelelser om Grønland», 1963, 174, 4.
- BARTHLOTT W., W. LAUER e A. PLACKE, *Global Distribution of Species Diversity in Vascular Plants: towards a World Map of Phytodiversity*, in «Erdkunde», 1996, 50, 4, pp. 317-327.
- BECKER A. e H. BUGMANN (a cura di), *Predicting Global Change Impacts on Mountain Hydrology and Ecology: Integrated Catchment Hydrology/Altitudinal Gradient Studies*, IGBP Report 43, Stoccolma, 1997.
- BENISTON M., *Environmental Change in Mountains and Uplands*, New York e Londra, Arnold Publishers e Oxford University Press, 2000.
- BENISTON M., *Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts*, in «Climatic Change», 2003, 59, pp. 5-31.
- BENISTON M., *Mountain Weather and Climate; a General Overview and a Focus on Climatic Change in the Alps*, in «Hydrobiologia», 2006, 562, pp. 3-16.
- BENISTON M. e P. JUNGO, *Shifts in the Distributions of Pressure, Temperature and Moisture in the Alpine Region in Response to the Behavior of the North Atlantic Oscillation*, in «Theoretical and Applied Climatology», 2002, 71, pp. 29-42.
- BIANCOTTI A. e M. MOTTA, *L'evoluzione recente ed attuale dei ghiacciai italiani*, in «Bollettino Geofisico», 2000, 3-4, pp. 27-36.
- BJÖRNSSON H., *Bæsigisarjökull, North Iceland. Results of Glaciological Investigations 1967-1968. Part II. The Energy Balance*, in «Jökull», 1972, 22, pp. 44-59.
- BÖHM R.I. e altri, *Regional Temperature Variability in the European Alps: 1760-1998 from Homogenized Instrumental Time Series*, in «International Journal of Climatology», 2001, 21, pp. 1779-1801.

- CITTERIO M. e altri, *The Fluctuations of Italian Glaciers During the Last Century: A Contribution to Knowledge about Alpine Glacier Changes*, in «Geografiska Annaler», 2007 (a), 89, A3, pp. 164-182.
- CITTERIO M. e altri, *Initial Results from the Automatic Weather Station (AWS) on the Ablation Tongue of Forni Glacier (Upper Valtellina, Italy)*, in «Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria», 2007 (b), pp. 141-151.
- CNR e CGI, *Catasto dei Ghiacciai Italiani-Ghiacciai della Lombardia e dell'Ortles-Cevedale*, Torino, CGI, 1961, III.
- D'ANDREA M., A. LISI e T. MEZZETTI (a cura di), *Patrimonio geologico e geodiversità. Esperienze ed attività dal Servizio Geologico d'Italia all'APAT*, Roma, IGER, 2006.
- DIAZ H.F. e R.S. BRADLEY, *Temperature Variations During the Last Century at High Elevation Sites*, in «Climatic Change», 1997, 36, pp. 253-279.
- DIOLAIUTI G. e altri, *La rete micro-meteorologica glaciale lombarda: un contributo alla conoscenza dei ghiacciai alpini e delle loro variazioni recenti*, in C. SMIRAGLIA, G. MORANDI e G. DIOLAIUTI (a cura di) «Clima e Ghiacciai. La crisi delle risorse glaciali in Lombardia», Regione Lombardia, 2009, pp. 69-92.
- DIXON G., *Geoconservation: An International Review and Strategy for Tasmania*, Tasmania, Parks & Wildlife Service, Occasional Paper No. 35, 1996, pp. 1-126.
- EBERHARD R., *Pattern and Process: Towards a Regional Approach to National Estate Assessment of Geodiversity*, Canberra, Australian Heritage Commission & Environment, Forest Taskforce, Environment Forest Taskforce, Environment Australia, 1997, pp. 1-102 («Technical Series» n. 2).
- ERIKSTAD L., *A Holistic Approach to Secure Geoconservation in Local Physical Planning*, in D. BARRETTINO, M. VALLEJO ed E. GALLEGO (a cura di), *Towards the Balanced Management and Conservation of the Geological Heritage in the New Millenium*, Madrid, Sociedad Geológica de España, 1999, pp. 69-72.
- GODDE P., M.F. PRICE e F.M. ZIMMERMANN, *Tourism and Development in Mountain Regions*, Wallingford, CABI Publishing, 2000.
- GREUELL W., W.H. KNAP e P.C. SMEETS, *Elevational Changes in Meteorological Variables Along a Midlatitude Glacier During Summer*, in «Journal of Geophysical Research», 1997, 102 (D22), pp. 25941-25954.
- HAEBERLI W., *Global Land-ice Monitoring: Present Status and Future Perspectives. United States Department of Energy, Glaciers, Ice Sheets and Sea Level: Effect of a CO₂ – Induced Climate Change*, Report DOE/EV 60235-I, Seattle WA, National Academy Press, 1985, pp. 216-231.
- HAEBERLI W. e M. BENISTON, *Climate Change and its Impacts on Glaciers and Permafrost in the Alps*, in «AMBIO A Journal of the Human Environment», 1998, 27, pp. 258-265.
- HOGG I.G.G., J.G. PAREN e R.J. TIMMIS, *Summer Heat and Ice Balances on Hodges Glacier, South Georgia, Falkland Islands Dependencies*, in «Journal of Glaciology», 1982, 28, pp. 221-228.
- ISHIKAWA N., I.F. OWENS e A.P. STURMAN, *Heat Balance Studies Characteristics During Fine Periods on the Lower Parts of the Franz Josef Glacier, South Westland, New Zealand*, in «International Journal of Climatology», 1992, 12, pp. 397-410.
- IUGG-UNEP-UNESCO, *Fluctuations of Glaciers 1995-2000*, Parigi, IUGG-UNEP-UNESCO, 2005, pp. 288.

- JUNGO P. e M. BENISTON, *Changes in 20th Century Extreme Temperature Anomalies at Swiss Climatological Stations Located at Different Latitudes and Altitudes*, in «Theoretical and Applied Climatology», 2001, 69, pp. 1-12.
- KAPOS V. e altri, *Developing a Map of the World's Mountain Forests*, in M.F. PRICE e N. BUTT, *Forests in a Sustainable Mountain Development*, Wallingford, CAB International, 2000.
- KLOK E.J., J.W. GREUELL e J. OERLEMANS, *Temporal and Spatial Variation of the Surface Albedo of the Morteratschgletscher, Switzerland, as Derived from 12 Landsat Images*, in «Journal of Glaciology», 2003, 49, 167, pp. 491-502.
- MEYBECK M., P. GREEN e C. VÖRÖSMARTY, *A New Typology for Mountains and Other Relief Classes: An Application to Global Continental Water Resources and Population Distribution*, in «Mountain Research and Development», 2001, 21, pp. 34-45.
- MOUNTAIN AGENDA, *Mountains of the World – Mountains, Energy and Transport*, Berna, CDE-Centre for Development and Environment, University of Berne, 2001.
- OERLEMANS J., *Analysis of a 3 Years Meteorological Record from the Ablation Zone of Morteratschgletscher, Switzerland: Energy and Mass Balance*, in «Journal of Glaciology», 2000, 46, 155, pp. 571-579.
- OERLEMANS J., *Glaciers and Climate Change*, Lisse, Balkema, 2001.
- OERLEMANS J., *The Microclimate of Glaciers*, in *Lecture at Karthaus Summer School 2005*, University of Utrecht, 2005 (consultabile in <http://igitur-archive.library.uu.nl/phys/2007-0504-200708/UUindex.html>).
- OERLEMANS J. e altri, *Modeling the Response of Glaciers to Climate Warming*, in «Climate Dynamics», 1998, 14, pp. 267-274.
- OERLEMANS J. e altri, *AWS in the Ablation Zone of Glaciers*, in J. OERLEMANS (a cura di), *Automatic Weather Station*, Pontresina (Svizzera), Workshop 28-31 marzo 2004, pp. 83-87.
- OERLEMANS J. e H.F. VUGTS, *A Meteorological Experiment in the Melting Zone of the Greenland Ice Sheet*, in «Bulletin of the American Meteorological Society», 1993, 74, pp. 355-365.
- PATZAK M., *Tourism and Geodiversity. The Case of Geoparks*, Parigi, Division of Earth Sciences, UNESCO, 2000, pp. 1-8.
- SHARPLES C., *A Methodology for the Identification of Significant Landforms and Geological Sites for Geoconservation Purpose*, Tasmania, Report to Forestry Commission, 1993.
- SMIRAGLIA C., *Le ricerche di glaciologia e di morfologia glaciale in Italia. Evoluzione recente e ipotesi di tendenza*, in A. BIANCOTTI e M. MOTTA (a cura di), *Risposta dei processi geomorfologici alle variazioni ambientali*, Genova, Brigati, 2003, pp. 397-407.
- UN, *Earth Summit: Agenda 21. The United Nations Programme of Action from Rio, The Final Text of Agreements Negotiated by Governments at the United Nations Conference on Environment and Development (UNCED)*, Rio de Janeiro, 3-14 giugno 1992.

METEOROLOGICAL EVOLUTION ON THE ABLATION ZONE OF FORNI GLACIER (LOMBARDIA, ORTLES-CEVEDALE GROUP) DURING THE PERIOD 2006-2008. – The Italian scientific research dealing with Alpine glacier meteorology started four years ago when in Lombardy some pilot experiments have been carried out. The first Automatic

Weather Stations (AWS) has been set up on the melting surface of the largest Italian Valley glacier: Forni, in the Stelvio National Park. The AWS was equipped with several different sensors to collect the main atmospheric parameters (air temperature, energy fluxes, air pressure, wind speed and direction, humidity, snow and liquid precipitations) for describing the glacier boundary layer. In the present contribution a 3 years long collection of glacier meteo-data (2006-2008) is shown (air temperature, Short Wave incoming and outgoing radiation and snow depth) to describe alpine glacier micro-meteorology.

Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra «A. Desio»

antonellasenese@yahoo.com

guglielmina.diolaiuti@unimi.it

claudia.mibalcea@unimi.it

claudio.smiraglia@unimi.it